

水下湿式焊接与切割

[英国]焊接研究所 著
[乌克兰]巴顿电焊研究所

焦向东 周灿丰 沈秋平 刘德华 陈煜 译

石油工业出版社

译者前言

两年之前即 2005 年,为了适应海洋结构物水下修复的需要,本书的部分译者与海洋石油工程股份有限公司房晓明总工程师合作翻译出版了《水下焊接修复技术》。2006 年 11 月,国家 863 课题“水下干式管道维修系统”在海上试验成功,以干式高压方法焊接成功了试验管道,象征着海底管道维修重大装备实现了中国造,也表明我国水下焊接技术取得了里程碑式的突破。

实际上,包括湿式焊接、局部干式焊接和干式高压焊接等在内的各种水下焊接方法,不仅广泛应用于海洋石油,而且在核电、港口、桥梁、船舶等其他“涉水”行业也是不可或缺的保驾护航技术,特别是将在我国需要长期重点发展的能源领域发挥重要作用。

国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》涉及大量能源方面的内容。该纲要提出的与能源相关的两个重大专项是:“大型油气田及煤层气开发”,以及“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站”。恰好,这两个重大专项涉及的海洋石油和核电都是水下焊接技术的主要应用领域。第一个专项提出“建立 4000 米深水技术研究领域,开发海洋 3000 米水深钻井船、 2×8000 吨大型超重铺管船、新型深海平台及水下生产设施等重大装备”。第二个专项提出“到 2010 年,完成 100 万千瓦级中国品牌的大型先进压水堆核电设计,建成具有自主知识产权的 20 万千瓦级模块式高温气冷堆商业化示范电站。到 2015 年,建成大型先进压水堆核电站商用示范机组,为发展第四代核电技术奠定基础”。可见,国家能源建设的需要对于水下焊接而言,任重道远,既是挑战,更是机遇。

为此,北京石油化工学院与海洋石油工程股份有限公司联合成立了“海洋工程连接技术研究中心”,中心的目标是成为“21 世纪的水下连接专家”,目前开展的主要研究有:水下干式高压焊接、水下局

部干式焊接、深水结构摩擦叠焊和深水海管铺设焊接等。

水下焊接技术源于海洋工程,推广于其他行业。但是,不同行业应用水下焊接技术有其不同特点。上海核工程研究设计院承担的国防科工委项目“堆内构件在役维修技术研究”,其中的“水下切割与焊接技术开发”子项目由北京石油化工学院海洋工程连接技术研究中心负责研究。核电堆内构件维修,一方面因为空间狭窄、构件量多且结构复杂,广泛用于海底管道维修的干式高压焊接难以适应,另一方面因为辐射污染、不能进入作业,所以采用的技术方案是“水下局部干式自动化熔化极气体保护焊”。

实际上,局部干式焊接并非核电堆内构件在役维修的唯一可行方案,还有另一个可行方案,那就是本书重点介绍的药芯丝焊。水下药芯丝焊是巴顿电焊研究所从 1970 年开始研发的湿式焊接创新技术,其目的是替换手工电弧焊。水下药芯丝焊在苏联有 25 年的应用经验,例如,超过 70 条跨越水下障碍的油气水输送管道,是采用药芯丝焊系统修复的,实践已经表明该方法至少在码头、平台、管道、轮船和其他相关领域进行应用是可行的。因为该技术与传统手工电弧湿式焊接和切割相比,具备足够的优越性,特别是显著提高了生产效率,所以在需要进行大量焊接和切割的场合更是意义彰显。1997 年 4 月,英国焊接研究所和巴顿电焊研究所在米德尔斯堡联合举办水下湿式焊接与切割国际会议,该技术得到了欧洲和美国焊接界的高度认可,该次会议的 10 篇论文集结则形成了《Underwater Wet Welding and Cutting》这本书。

因为水下药芯丝焊技术的特点,使得其可以方便地与水下机器人 ROV 或者其他水下机械手结合,进行远程焊接和切割,从而在海洋石油深水结构物、核电堆内构件维修等方面具备良好的应用前景,所以,我们决定推出《Underwater Wet Welding and Cutting》的中文版本《水下湿式焊接与切割》。

《水下湿式焊接与切割》的翻译工作,由北京石油化工学院海洋工程连接技术研究中心焦向东、周灿丰与上海核工程研究设计院沈秋平、刘德华、陈煜合作完成。焦向东教授主持翻译工作,周灿丰教

授审阅译稿。第1、3、4篇文章由沈秋平高级工程师独立翻译,第6、7、8篇文章由刘德华工程师独立翻译,第9、10篇文章由陈煜工程师独立翻译,第2、5篇文章由沈秋平高级工程师、刘德华工程师和陈煜工程师合作翻译。

在该书翻译过程之中,北京石油化工学院海洋工程连接技术研究中心硕士研究生孙法强、孙昕辉、董继红做了大量文字工作,博士研究生高辉、朱加雷做了大量与之相关的水下焊接技术研究工作,在此,对他们的工作表示感谢。

谢谢大家阅读此书。

2007年5月

目 录

PWI 在水下焊接与切割技术领域的工作·····	(1)
钢结构湿式焊接物理冶金特性研究 ·····	(7)
用于钢材全位置手工水下焊接的电焊条研制 ·····	(37)
PWI 设计的水下焊接与切割特殊设备 ·····	(52)
商用电焊条湿式水下焊接试验 ·····	(57)
药芯焊丝水下半自动焊的技术特性 ·····	(80)
药芯焊丝水下半自动焊的现场应用 ·····	(90)
无需供水的水下药芯焊丝切割特性研究 ·····	(101)
水下药芯焊丝半自动切割技术与应用 ·····	(111)
水下药芯焊丝湿式焊接 ·····	(121)

PWI 在水下焊接与切割 技术领域的研究工作

B E Paton

巴顿电焊研究所

现在我们再也不能说金属的水下切割和焊接只是个想法。远非如此,世界上许多著名的机构和公司都致力于该领域的研究,并且在科学和技术方面不是没有获得成功。因为他们的努力,初步揭示了水下焊接现象的本质,并且,通过非常重要而有效的水下焊接和切割设备的大量研发,以及对要处理的作业困难的认知,导致该领域产生根本性的进步。

乌克兰科学院下属的巴顿电焊研究所对水下焊接技术的发展也做出了实质性贡献。

为了维修和建造海洋结构物而进行的研究开发,促使水下焊接不再仅仅是偶然,而是取得了持续的进步。水下焊接应用范围在不断发展。例如,海底油气及其他矿物资源生产所需要的平台的安装建造,船舶起吊维修,海上打捞营救,海底管道铺设,港口桥梁的定期服务维修,而且这些绝非是水下焊接应用的完整案例。与陆上结构物相比,当今重要海洋结构物的焊接接头的质量级别不能低,也不能存在显著差异,但是,水下焊接的物理化学和冶金过程却是发生在最为恶劣的极端严酷环境。这些条件的典型特点是:热量散发增强、熔池金属富含氢,以及环境压力增加,需要进行全面的理论和实验研究,并且要考虑水下焊接特殊性。该领域的研究开发应该包括冷却速度、氢饱和度和静压力以及其他影响焊接过程和接头质量的因素。应该根据钢材

的焊接性进行研究,有必要研究特殊的焊接材料、焊接方法和焊接程序。此外,还应该包括作业过程机械化自动化的基本原则,以及远程控制监视系统的研发。

根据实施条件的不同,水下焊接一般分为湿式焊接和干式焊接。湿式焊接直接在水中进行焊接,电极、电弧或者工件与环境之间没有任何隔离。干式焊接的实施条件是焊接区域完全与水隔离。水下焊接专家都很好地认识到了作业方法的特点,但是,重要的是,所有工业国家的水下焊接研究,都是从湿式焊接开始的,包括苏联在内。

苏联早在 20 世纪 30 年代就开始了水下焊接领域的开创性研究。1932 年, K. K. Khrenov 采用电焊条进行手工水下电弧焊接。该技术在维修、打捞营救中得到了应用。

第一次世界大战以后水下焊接的特点是,仅仅以手工电弧焊接为代表。改进这种方法的初始目的是,改善电焊条和研发新焊条,从而消除焊接过程中的氢饱和副作用以及提高焊接能力。通过这些努力,研发出了低碳钢焊接 EPO - 55 级焊条,使潜水焊工的生产效率提高了 15%,但是焊条只能用于平焊而不能用于其他位置的焊接。

经过 20 世纪 50 年代中期的经验积累,手工电弧焊的不足开始暴露。该方法不能保证完整的接头强度,只能达到 60% ~ 70% 的水平,焊接速度仍然很低,不超过 2m/h。潜水焊工的技术和素质对焊接质量影响很大。

其他国家的情况,也是如此。在西方公司,对于湿式焊接不能保证接头完整强度的问题,只要是可行的场合,他们更倾向于首先选择干式焊接,因为干式焊接能够保证高质量的接头。但是,虽然手工湿式焊接不能从根本上解决问题,却也没有被丢弃。直到现在,手工湿式焊接仍然应用于海洋非重要结构物的维修以及紧急事件处理。

与此同时,苏联,主要是乌克兰和俄罗斯,在持续进行的也仅仅是改善水下湿式焊接的探索性、基础性和应用性研究工作。从 1965 年以来,巴顿电焊研究所在该领域尤其积极。随着时间的推移,我们建立了专门的实验室来研究水下金属焊接和切割技术,其主要成绩将在

后面进行具体介绍。现在,该实验室装备有专门用于研究的深水环境模拟舱,主要由储水容器、特殊的焊接设备以及计算机设备组成。当然,实验室还配备了潜水站。根据不断增加的需求,我们的潜水员既要参加研究工作,也要进行实践作业。A. E. Asnis 教授和 I. M. Savich 博士对实验室建立、装备及研究人员训练发挥了积极作用。因为在水下焊接领域取得的研发成果,他们获得了乌克兰国家勋章。现在,该实验室由 Yu. Ya. Gretskey 教授负责。

现在,我们将更加详细地介绍实验室的工作。实验室最初的目的是焊接和切割过程的机械化。我们最初的实验工作,导致我们形成了自己的标准。我们得出结论,实心焊丝 CO_2 保护半自动焊非常困难,没有发展前景,接头弯曲角度小于 50° 。因为接头塑性低,延伸率小于 9%,特别是对于一些重要的应用,手工焊没有前景。从那时起,我们就形成了发展湿式焊接的基本技术思想,也就是自保护药芯焊丝。

这种思想因为其方法的优点明显而受到欢迎。药芯焊丝的特点是化学成分可以大范围改变。这使得即使没有外加气体或者熔融金属保护,同样存在进行高密度高强度焊接的可行性。可靠的屏蔽由焊丝自身提供,例如,通过选择合适的焊丝化学成分。我们相信,焊缝金属氢饱和与热影响区域问题,以及这些问题导致的众所周知的后果,通过对焊丝的特殊设计,即使不能全部至少也能部分地得以解决。焊丝表面直接和水接触而潮湿,该焊丝芯部由外壳进行保护,因此具备缓解氢饱和的优点。此外,采用自保护药芯焊丝,意味着可以取消那些导致焊枪重量增加、潜水焊工作业困难的附加装置,最终极大地简化了基本操作。采用药芯焊丝,解决了上述问题,从而使得半自动焊具备灵活性、多功能性等特点。非常明显,采用该方法,焊接操作连贯性问题得以解决,潜水焊工工作效率得到极大提高,水下停留时间大幅度缩短。此外,通常半自动焊比手工焊更容易掌握,这个优势在水下焊接条件下同样存在。这实际上是人的因素,采用药芯焊丝能够简化水下焊接作业人员的选择和培训。

这种设想的有效性在下面的工作过程中得以证实。

以前面的假设为基础,对湿式焊接方法开展基础研究,做了以下一些工作。根据淡水和不同浓度盐水两种情况,同时研究电弧燃烧情况。研究人员明确了在不同水压之下电弧稳定燃烧的条件,确定了焊接烟雾组成,及其在高氧化性蒸气气泡环境中与熔融金属之间的相互作用。他们研究了金属结构物合金化的影响、焊缝金属性质,以及合金元素直接在水中从焊丝向焊缝金属的过渡。研究人员确定了减少焊缝金属气孔和非金属夹渣的条件,以及水压和焊接参数对焊接接头机械性能、钢材及非铁金属机械化水下切割质量和经济性指标的影响等。研究人员集中精力于焊丝直径优化、水下焊接切割参数优化,以及在各种空间位置形成对接焊缝、角焊缝和堆焊缝的焊接程序。实验室的该类研究工作还可以继续列举,但是,希望上述介绍足以表明巴顿电焊研究所开展的水下焊接切割研发工作,是建立在全面而具有针对性的研究基础之上。

巴顿电焊研究所在焊接材料方面的成果是,能够提供用于 20m 水深 500MPa 抗拉强度低碳钢和低合金钢湿式焊接的药芯焊丝,以及用于 60m 水深的淡水或海水环境钢材和合金电弧切割的药芯焊丝。在上述条件之下,研制的自保护药芯焊丝能够提供强度级别足够高的焊接接头,而且特别重要的是,焊缝金属塑性能够满足美国焊接学会与世界一流专家制订的水下焊接 ANSI/AWS - 23.6 规范规定的 A 类接头的要求。

巴顿电焊研究所对于手工焊接的研究从未停止,所以能够提供自行研制的新焊条,其特点是可以在任何空间位置进行焊接。不同于现有焊条,新焊条能够为焊缝金属提供足够高的塑性,延伸率稳定在 12% ~ 14%,无论根弯还是面弯,其弯曲角度达到 180°。所以,新焊条保证焊接接头质量水平不低于前述规范规定的 B 类接头的要求。至于水下电弧切割的发展而言,有 3 种药芯焊丝可供选择,并且可以进行商业应用,使用时均都不需要往电弧区域额外供氧。棒状焊条和管状焊条,以及不仅可以用来切割钢也可以用来切割塑料、木材等非金属材料的发热焊条,均可以利用。

我们认为,巴顿电焊研究所研制的水下药芯焊丝焊接切割设备是独一无二的,其半自动焊设备的特点是送丝装置完全浸入水中,因而作业时可以尽量地靠近潜水焊工。根据多年使用 A-1660 型设备的经验,潜水焊工对这种设计特点予以高度评价。当然,该自动焊设备仍有改进余地,这个问题将单独介绍。

巴顿电焊研究所的研究主线之一是钢材的水下闪光对焊,过去 4 年,该领域的研发工作一直活跃。目前,我们设法论证了闪光对焊用于海洋结构物和管道建造维修的可能性。

我们希望该技术能够实现以下目的:

(1)代替直接参与水下焊接的潜水焊工,大幅度降低保障其生产安全的成本;

(2)提高焊接操作的可行性;

(3)保证焊接接头的一致性和高质量,排除焊工和劳动条件对接头质量的影响;

(4)消除水压对焊接接头质量的影响;

(5)简化质量检验程序。

因为水下商业测试表明巴顿电焊研究所研发的技术效果良好,所以该领域的研究工作仍然在继续。

现在我们回到对湿式电弧焊接和切割的讨论,必须对使用该技术的若干问题进行详细描述。从焊接性的角度而言,相对简单的平均抗拉强度 350MPa 低碳钢和低合金钢的药芯焊丝焊接问题,可以认为已经解决。在 20m 水深,可以形成与母材强度相当的焊接接头。但是,目前的要求是对 50 ~ 60m 的更深水深、强度更高的钢材进行可靠的焊接。我们希望已经发明的方法、积累的知识和经验,能够帮助解决这些问题,甚至海底管道修复等更加复杂的问题。

另一个热点问题是锈钢的水下焊接。在核电站高放射性条件下,对 Kh18N10 型奥氏体钢金属结构焊接有时是不可缺少的。为了减少辐射危害,用水覆盖该结构是明智的,从而需要在水中焊接。

一些国际会议论文表明,美国和日本正在致力于寻找解决这个问题

题的方法。他们的研究包括对现有焊条进行不锈钢水下焊接适应性评估,但是,至今没有解决焊接接头气孔和裂纹的问题。如果在给定条件之下,采用手工焊接,因为生产效率低以及潜水焊工在辐射源附近停留时间有限,潜水焊工需要频繁潜入水中以致规定的焊接工作难以完成,这种方法的缺点非常明显。显然,采用机械化自动化作业可以减少焊工在辐射源附近的停留时间。巴顿电焊研究所的工作表明,药芯焊丝可以用于不锈钢水下焊接,从而可以认为,我们的经验对此将大有帮助。我们认为,该问题的成功解决,将是水下湿式焊接机械化的突破,将在现有基础之上提高作业自动化水平。

还有一个观点需要提及,那就是人们在一定程度上认为湿式焊接是一个整体,而水下药芯焊丝焊接是一个具体应用。我们非常高兴,1994年11月7~9日在美国 Louisiana 的 New Orleans 举行的海工结构水下焊接国际研讨会已经认识到,水下湿式药芯丝焊接是很有前景的方法。当然,这种评估是有根据的。例如,这种方法直接用于水下操作,形成的焊接接头的塑性达到 ANSI/AWSD3.6 标准规定的 A 级接头的要求。在独联体国家,药芯丝焊接修复的河底管道已经可靠地运行了 20 年之久。这种方法还被成功用于水面船舶维修。水下焊接接头承受周期载荷的疲劳强度调查研究表明,这些水下焊接接头至少不低于采用焊条在常规条件之下形成的焊接接头。这些结果使我们确信,湿式药芯丝焊接值得进一步研发升级,同时表明,我们可以进行广泛的合作研究。

钢结构湿式焊接物理冶金特性研究

K A Yushchenko, Yu Ya Gretsii, S Yu Maksimov

巴顿电焊研究所

引 言

现在,我们不能再断言水下焊接的物理现象和冶金特性仍完全未知。恰恰相反,因为类似巴顿电焊研究所这样著名研究机构许多科研人员的研究开发,大量工作得以开展,在该领域获得了颇有价值的信息。当然,当时我们更感兴趣的是湿式焊接的科学基础,这也是水下焊接与切割会议召开以来希望着力解决的问题。简而言之,关于湿式焊接特殊性所形成的观点如下。

主要是水与空气物理特征的差异决定了焊接过程的特点。电弧存在的必要条件是电弧周围电弧空腔也就是所谓气袋的存在。当焊条接触母材时,电流加热接触区域,此时形成气袋。焊条分解之后,电弧在气袋内部燃烧。由焊条涂层分解物、母材与焊条反应物,以及电弧中水的分解物组成的气体,促使气袋增长。由于电弧燃烧,气袋体积增长到临界尺寸,然后 80% ~ 90% 的气袋逸出水面,同时形成新的气袋。气袋半径从最小到临界状态的变化范围,淡水中为 0.7 ~ 1.65cm,盐水中为 0.8 ~ 2.3cm。气袋中的气体交换相当密集,其成分通常认为每秒更新 8 ~ 10 次。气袋中的氢气含量提高了静水压力,周围气流冷却作用增强,导致电弧收缩。因为电弧收缩,电流密度达到 11200 ~ 14280 A/m²,这是空气中相同半径焊条电流密度的 5 ~ 10 倍。熔滴温度范围建议为 2560℃ 到能使金属沸腾的温度。

气袋气体由 62% ~ 92% 的 H₂、11% ~ 24% 的 CO、4% ~ 6% CO₂、

O_2 、 N_2 和微量气态金属构成。因为电弧气氛内氢的含量很大,所以氢脆敏感性成为特别关键的问题。

焊接区域的冷却速率比空气中 $200 \sim 300^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度平均快 $2 \sim 3$ 倍。快速冷却导致 HAZ 硬度高,淬火、气孔和夹渣导致 HAZ 冲击功低,以及不好的焊缝外观。

周围水压对热力学、动力学以及电弧与熔池之间复杂反应的平衡都有明显的影响。水压导致熔融金属中气体溶解度增加,所以,随着水深增加,水下湿式焊接接头中的氢气和氧气含量增加。从而,深水焊接中气孔和非金属夹渣成为突出的问题。

所以,对于水下湿式焊接而言,因为上面所说的原因,要获得和在空气中同样的接头质量,是相当困难的。

为了开发湿式焊接耗材和焊接技术,巴顿电焊研究所的研究人员采用药芯焊丝和手工焊对上述问题进行了大量研究,其主要研究成果报告在下面陆续介绍。

电弧物理特性

尽管水下电弧的具体条件不同,但是电弧发生的物理过程和空气中极度相似。所以,采用高速摄影^[1]、X - 射线摄影^[2] 同步结合电流—电压示波器,可以知道,尽管水蒸气气泡周期性变化,但是,只要电极与工件之间的距离不变,那么电弧电势恒定。这个事实证明,电弧的产生过程基本不依赖于弧柱与气泡壁之间的距离。高速摄影和 X - 射线摄影的结果表明气泡比弧柱大。因此,如果水下焊接电弧在气泡中的发展不受电极尺寸所限制,电弧不被喷射气体吹破,并且不被特殊结构喷嘴约束,那么可以把水下焊接电弧看做是自由电弧^[3]。据此,如果考虑一些附加特性,自由电弧模型方程可以用来估计水下焊接电弧的主要特征^[3]。计算数据和实验结果表明:在 $0 \sim 100\text{m}$ 水深范围内,水深每增加 10m ,电弧电压平均增加 $1.5 \sim 2\text{V}$;在 $100 \sim 300\text{m}$ 水深范围内,水深每增加 100m ,电弧电压平均增加 $4.5 \sim 5\text{V}$ ^[3]。采用电弧电压水深公式 $U_a = f(H)$ 获得的数据,与日本研究人员的实验数据,表现出很好的一致性^[4]。

采用专门的微机分析仪 ANP - 2 来研究水下药芯焊丝的电弧燃烧和熔滴过渡特性,该仪器能够测量电弧参数随时间的变化,并且把所获得的信息记录为图表和数字。研究结果表明^[5],电弧持续时间、短路电流频率和熄弧频率随着水深增加而明显增加,焊接过程稳定性恶化。观察结果表明,焊接电流的增加与短路电流的数量增加密切相关。把稀有金属加入药芯焊丝,能够明显提高电弧的稳定性,短路和熄弧时间大致减少一半。这些问题将在药芯焊丝半自动湿式焊接的报告中进行更加详细的介绍。

电弧和电弧间隙等主要参数与水深之间的关系,可以借助于物理—数学模型进行理论研究。很大水深范围之内的计算结果见表 1。弧柱温度、电弧长度、弧柱半径和熔滴半径的变化特征如图 1 所示。数据表明,电弧参数的重大变化估计发生在 300 ~ 400m 水深。随着水深进一步增加,则认为参数是稳定的。

表 1 电弧参数与水深的关系

水深, m	0	20	100	280	820	2440
弧柱温度, K	8170	8550	8590	9370	9810	10270
电弧长度, mm	2.5	2.08	1.73	1.45	1.2	1.0
弧柱半径, mm	1.1	0.92	0.76	0.63	0.53	0.44
熔滴半径, mm	1.98	1.89	1.79	1.67	1.55	1.38

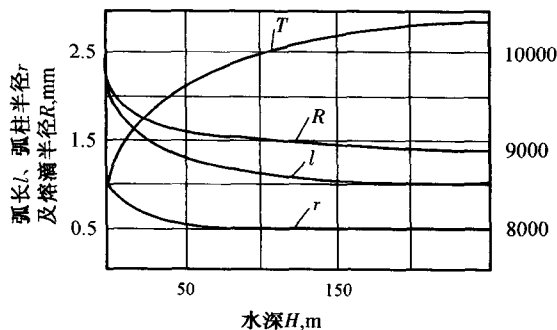


图 1 温度、弧长、弧柱半径及熔滴半径与水深的关系

电压—电流静态特性评价是焊接电弧研究的基本问题之一。采用直径4~6mm水下焊条MMA焊和细实心焊丝湿式半自动焊,开展了该项研究。业已证明,水下电弧燃烧的电压—电流静特性曲线呈凹形,如图2所示。在130~200A范围之内,电压 U_a 的最小值与电流相对应,具体数值取决于电极直径和电弧长度。因为电压—电流静特性曲线呈凹形,水下燃烧电弧比常规条件下的电弧弱。水下电弧燃烧的电压—电流静特性凹形曲线,可以用电弧压缩来解释:(1)氢气和水压导致冷却效应加剧;(2)电极端部几何尺寸制约导致阴极斑点集中、焊接电流增加。

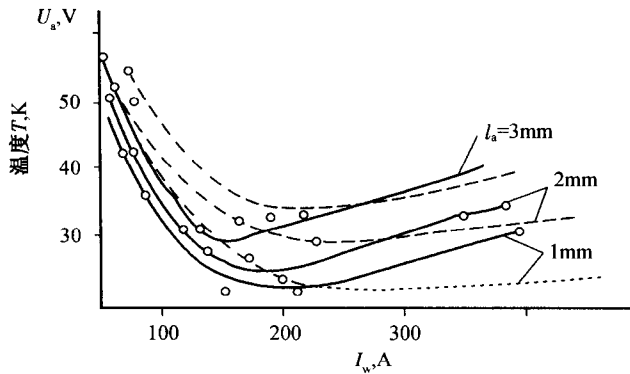


图2 水下燃烧电弧的电压—电流特性曲线(直流反接,淡水环境)

----- 4mm 直径电极; 6mm 直径电极

对比淡水和海水焊接,示波器显示表明,随着盐度的增加,焊接过程的稳定性增加,引弧时间缩短。淡水引弧时间0.98s,而含盐量3%和4%的盐水,相应的引弧时间分别为0.56s和0.36s^[6]。数据说明,在淡水之中获得稳定的焊接过程和高质量焊接接头要比在海水之中更加困难。海水的稳定作用,可以用盐的分解来解释。已经确证,氯的消极影响并不是表现为低活性阴离子对电弧稳定性的影响。由于具体条件和低活性氯离子,而后者不能及时表现其对电弧的不利影响,或者说是氯离子不足以打乱电弧在海水中的燃烧。文献[6]也提出,部分氯离子与水中或者分解逃逸的氢离子结合,形成易挥发的HCl混合物,从而氯离子以这种方式离开电弧区域。

现在,水下焊接的电源安装在船上。因此,电源不可能接近焊接区域。从而,特别是对于深水焊接,外部电线的长度意义突出。由于电弧电压的明显下降和电源平特性,输出电压降低。对于送丝速度不变的半自动焊而言,电弧的稳定性恶化。采用这种连接方式进行机械化水下焊接时,通过自适应调节系统,着力于确定典型干扰与弧长之间关系的可行性分析研究得以开展^[7]。半自动焊接外部焊接电路总电阻的计算表明,随着水深增加,电源的电压—电流刚性显著降低,如图3所示。其结果是,“电源—电弧”系统的稳定系数(K_s)显著增加。所以,与电弧长度变化(τ_a)相对应的持续时间随着水深增加而显著增加,所以,自调节能力降低。实际上,对于全部研究水深而言,水下电弧自适应系统保持稳定(表2)。

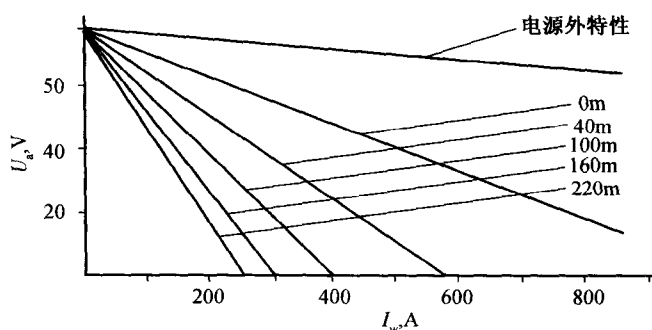


图3 电源外特性刚度与水深关系

表2 不同水深弧长自调节计算数据

水深 m	外部电路 电阻, Ω	空载电压 V	电源外特性斜率, V/A		稳定系数 K_s V/A	持续时间 τ_a , s
			电源	电弧		
0	0.049	39 ~ 41	-0.01	-0.059	0.059	0.292
40	0.108	62 ~ 65	-0.01	-0.118	0.118	0.429
100	0.167	80 ~ 84	-0.03	-0.197	0.207	0.619
160	0.226	100 ~ 104	-0.04	-0.266	0.306	0.811
220	0.285	118 ~ 120	-0.06	-0.345	0.435	1.013

研究表明,水下半自动焊接自调节系统的响应速度取决于电源电压—电流外特性曲线斜率,弧柱的电场强度,以及焊接电流和电弧电压自调节系数。虽然,空气中焊接的这些规律已经掌握,但是,水下焊接自调节过程的特殊性在于外部电阻非常之大,导致自调节系统刚性显著下降,以至于弧柱电场强度和电流自调节系数对自调节系统的影响,与空气中焊接相比,显得微不足道。所以,降低外部电路电阻对于提高电弧自调节能力、改善焊接质量,是最有效的方法,深水焊接尤其如此。

水下湿式焊接最大的问题之一是熔池金属与气体的相互作用,特别是熔池金属因为 $55 \sim 60\text{m}^3/100\text{g}$ 的氢而不可避免地达到饱和状态^[8,9]。根据焊接条件的不同,逃逸气体中氢的含量达到 62% ~ 95%^[8,10,11,12]。

为了降低蒸气气泡和熔敷金属中氢的含量,或者部分地中和其有害影响,可以采取以下几种方法:给药芯焊丝或者焊条表皮增加有效成分,通过其他气体稀释气泡、降低氢气分压;采用特殊的屏蔽气体;改变焊接参数,例如电流、电压、电弧长度等;采用对氢饱和几乎不敏感的耗材,形成焊接接头。

在湿式焊接中,降低氢气分压有两种方法:(1)在耗材熔融过程中,形成电弧环境中其他类型的气体;(2)添加化合物,使得氢不能溶解在液体金属中。这两种方法都采用手工焊接进行了评估。

研究的第一种方法是,改变金红石和大理石的比例^[9]。由图 4 可见,大理石分解增加 CO 和 CO₂ 浓度,相应的降低了逃逸气体中氢气的浓度。已经证明,当氢气分压达到 60% 的时候,则成为决定性因素,并且其他气体对熔融金属的氢饱和度不产生影响(见图 5)。

根据第二种方法,我们试图通过氢气、水蒸气与氟化物相互作用形成耐热的氢氟化合物来降低氢含量。以此为目的,氟石添加到金红石外皮之中^[13]。如图 6 所示,外皮成分的研究表明,随着 CaF₂ 的含量从 0 增加到 86%,氢在焊接接头中的含量降低。非常明显,氢气、水蒸气与 CaF₂ 相互作用,形成的氢氟化合物从熔池金属中逃逸。